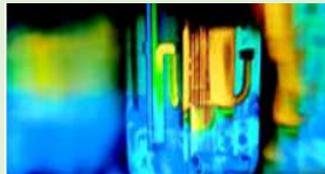


RÉSEAUX ÉLECTRIQUES ET RÉSEAUX D'ÉNERGIE

ANALYSE SYSTÈME

Paluel 4x1300MW



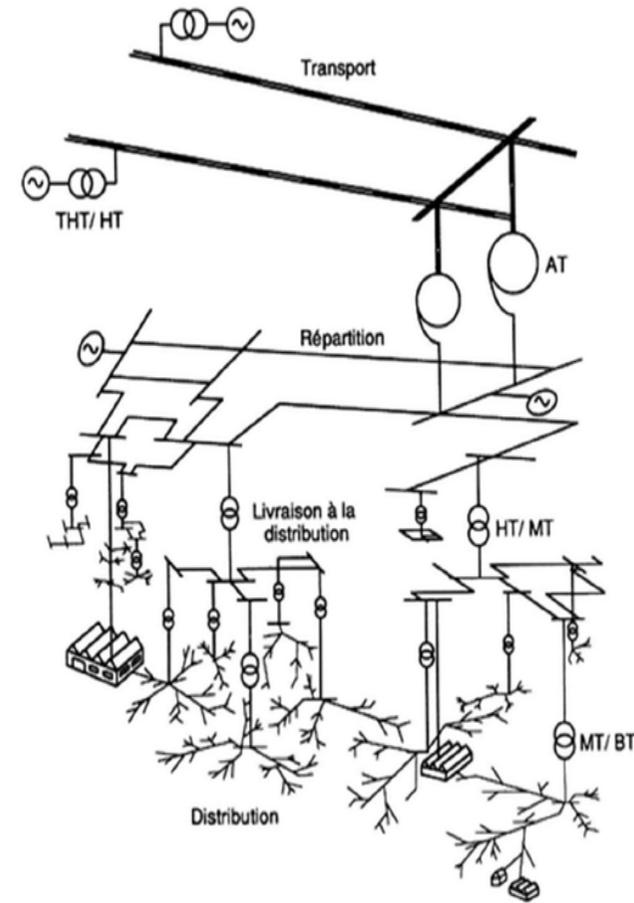
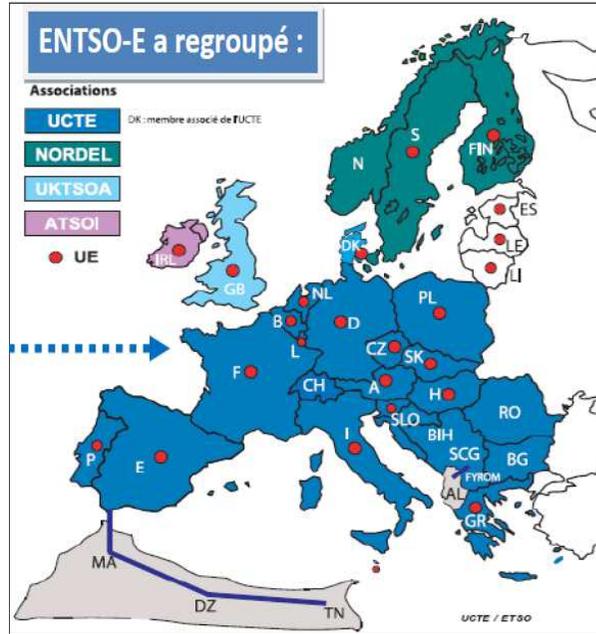
Cad 12MW + 4 Stockage



HYDRO 21 7 DÉCEMBRE 2018

David Fraboulet

Le Réseau Electrique



AT autotransformateur
BT basse tension
HT haute tension
MT moyenne tension
THT très haute tension

- Grand transport THT 400-225kV
- Répartition Régionale HT 225 90 63 kV
- Distribution étoilée HTA 20 15kV
- Basse Tension 400V tri, 230V Mono
- Historiquement : Co-développement avec les moyens de production
- Des lignes, des postes, un pilotage, une anticipation.



Equilibre Statique Réseau (spatio-temporel)

Production = Consumption

Nouveaux paradigmes ?

- Auto-consumption, auto production ?
- Stockage d'énergie ?
- Effacement et reports de consommation ?
- Importation/exportations ?
- Nouvelles règles de marché ?
- Smart grid ? ,...

$$\text{Prod.} + \text{Import} - \text{Eff}_{\text{prod}} + \text{Destockage} = \text{Cons} + \text{Export} - \text{Eff}_{\text{cons}} + \text{Stockage}$$

En "tout point",
A tout instant,
A toute échelle,
Pour tout "business model",
....

+ **Equilibre dynamique**
(notion de service réseau)



Éléments techniques clés

- Angle d'analyse : les « **flexibilités** » : de production, de consommation.
 - Echelles de **temps** :
 - milliseconde, seconde,
 - minutes, heure, semaine, mois
 - Investissements multi-décennaux
 - Echelles **spatiales**
 - Installation individuelle => échelle continentale,
 - réalité des acheminements et « Plaque de cuivre »
 - « tous les MWh n'ont pas la même valeur d'usage ».
 - Analyses de **cycle de vie complet** indispensable.
-

Technologies de production électrique pilotée

- **1- Centrales thermiques à flamme**

- Cycle Ouvert : Flexibilité : 20%/Minute, rendement 40%
- Cycles combinés : **Flexibilité 8-10%/Minute, rendement 60%**

Rq France < 70 gCO₂/kWh, Allemagne > 400gCO₂/kWh

⇒ Capture Séquestration ?

⇒ Bio-carburants ? (voir plus loin)



- **2- Centrales nucléaires**

- Standard **5% PN/minute**
- Compte tenu des puissance installées : 1^{er} gisement de flexibilité en France

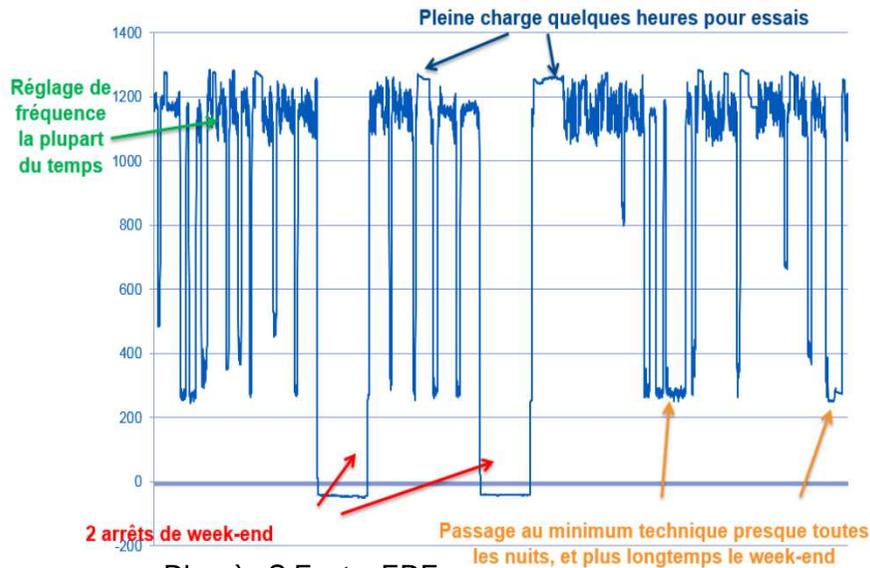




Pilotabilité nucléaire (en France)

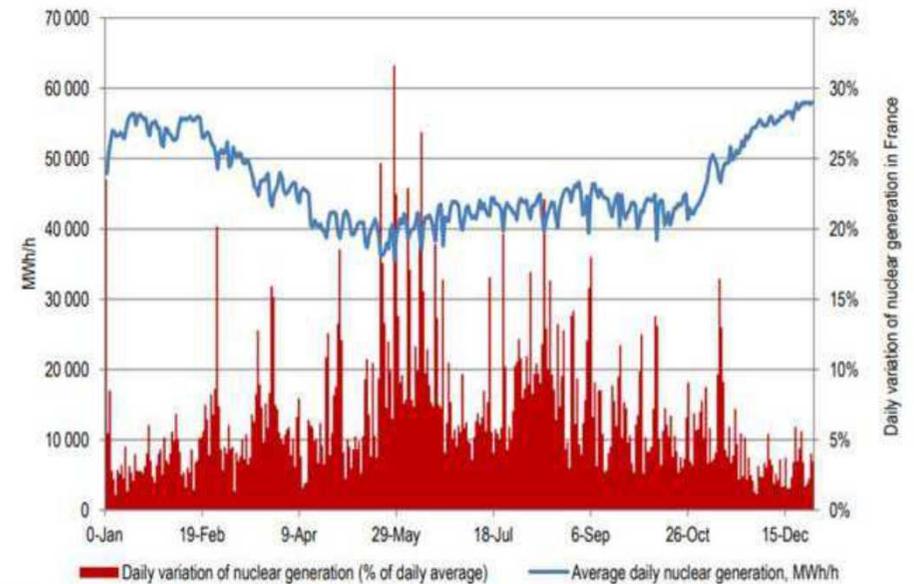
Par pilotage du réacteur (de 100 à 20%)

Production – Golfech 2 – Juin 2013 – KU 65 %



D'après S Feutry EDF.

Par pilotage du parc (58 réacteurs en 19 sites)



Source: RTE - Réseau de transport d'électricité (France).

- Besoin indispensable dès la conception du parc pour s'adapter à la consommation variable.
- Capacités de flexibilité suffisent aux besoins actuels : quid si réduction Parc Nuke et accroissement EnRs ?
- **Taux de charge et compétitivité ?** Contraintes techniques ? Vieillessement ?



Autres productions pilotables

• Hydraulique

- « STEP » = **Stockage 0,1 TWh.**
- **Total Stockage Hydro 3.5TWh** (Lacs principalement...), renouvelé 3-4 fois par an, selon conditions climatiques (=17TWh production lacs annuelle)
(pour mémoire électricité **consommée** en France= **1-2 TWh/jour**).
- Eclusé : Total 3.5TWh ?
- Fil de l'eau (peu pilotable).



Grand'Maison 1800MW

• Biomasse ?

- Besoin impératif de cycle de vie complet
(Bilan CO₂ et environnemental)
 - Analyse de **ressource (précieuse et limitée)**
 - Actuelle 9 Mtep Bois + 2.6Mtep carburants transformés
 - Ultime 20 Mtep ?? (Pour mémoire Transport 50Mtep)
- ⇒ **Choix délicat des usages**
- ⇒ Carburants biosynthétiques (avec apport énergétique externe)



Croisements de vecteurs : Electrique/gaz/chaaleur



Gaz

Stockage Canalisations 5-10TWh ?

Stockages supplémentaires réservoirs 130TWh ?

Linéaires transport **10x moins chers**

Dépendance 98% CO2 ?

Gaz synthétiques?
Bio-synthétiques ?

Privilégier usages finaux chaaleur et rééquilibrage P=C (l'hiver)



EnRi : Solaire Photovoltaïque



- **Hier** produire un maximum d'Énergie
- **Aujourd'hui** : vente sur marchés
 - => prédiction de production
- **Demain** : participer à l'équilibre et à la qualité des réseaux :
 - Optimisation de la répartition spatiale et temporelle des installations
 - Centrales pilotables : convertisseurs EP.
 - Emulation d'inertie, injection de réactif
 - Contrôle de qualité des harmoniques (du 50Hz)
 - Vieillesse des convertisseurs
 - (durée de vie 7-10 ans, moitié de celle des panneaux)



EnRi : Eolien

- systématiquement redressement puis ré-ondulation du courant produit =>

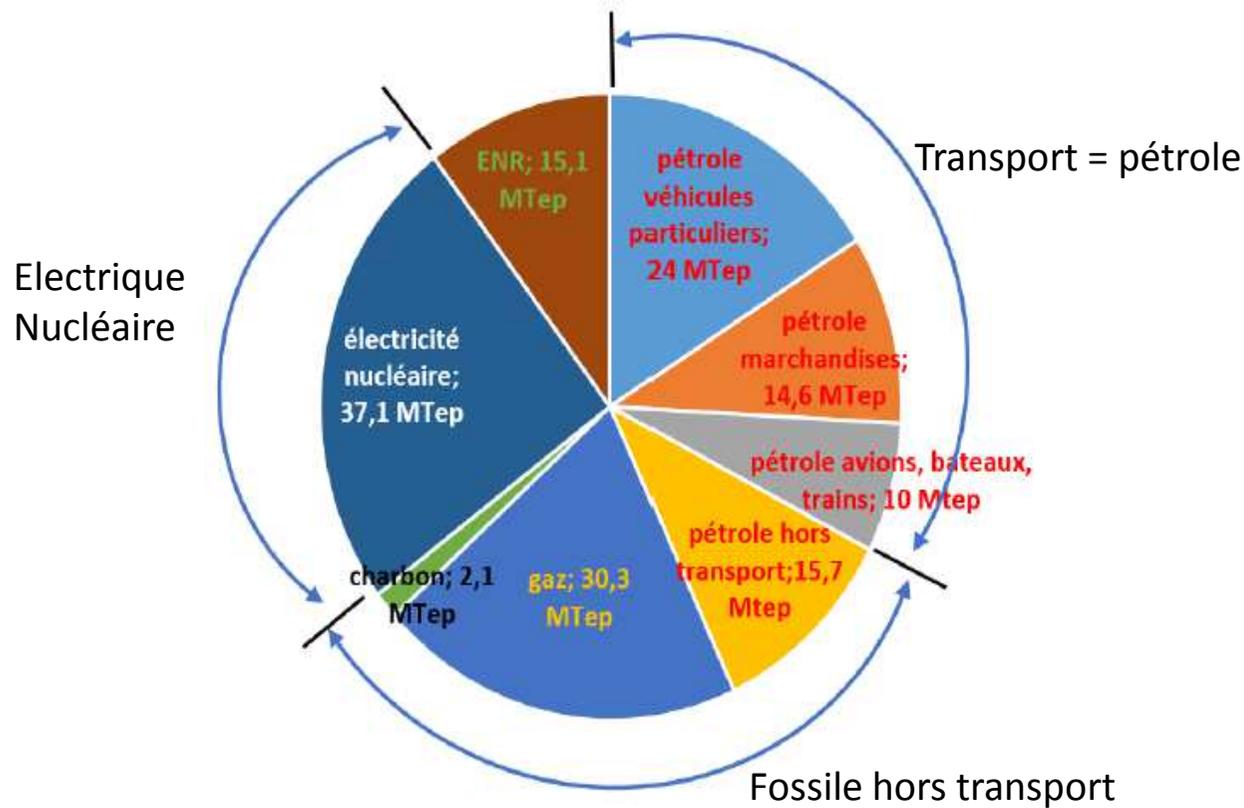
Problématiques techniques voisines du PV sur
Electronique de puissance

- Intermittence d'une nature différente (à étudier en détail) de celle du PV :
 - Moins saisonnier, moins quotidien
 - Moins prédictible, moins régulier
 - **Foisonnement à étudier de près.**

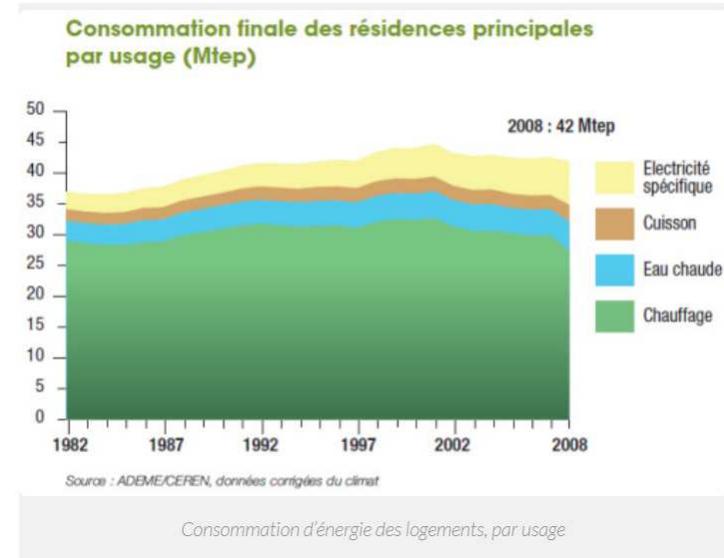




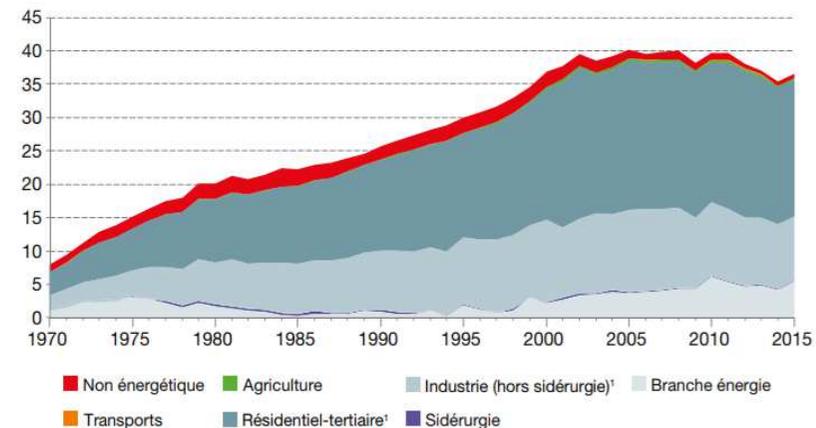
Consommation d'Énergie en France



- 2/3 : d'origine fossile.
- Pétrole majoritairement pour transport (50MTep, stable depuis 20 ans)
- Gaz principalement pour chauffage et eau chaude (tertiaire et habitat).



CONSOMMATION PRIMAIRE¹ DE GAZ NATUREL PAR SECTEUR : 473,9 TWh EN 2015
En Mtep PCI²



¹ Consommation corrigée des variations climatiques.

² 1 TWh PCS = 1 milliard de kWh en pouvoir calorifique supérieur (définitions p. 67).
Champ : métropole.

Sources : SOeS, enquête annuelle sur la statistique gazière ; Fédération française de l'acier

Leviers de flexibilité coté Consommation ?

• Transport

- Parc VP TOTALEMENT Electrifié : $20\text{kWh} \times 30^{\text{e}6} = 0.6 \text{ TWh}$ de stockage.
- Débat entre véhicules tous électriques et PHEV
- Opportunité des « routes électriques »
- Gestion d'usage et impact sur les réseaux énergétiques : contrainte et opportunité.

• Résidentiel et tertiaire

- Dynamique plus lente,
- Grandes Marges d'efficacité (pompes à chaleur)
- Opportunité de stockage (thermique) et d'effacement

• Industriel

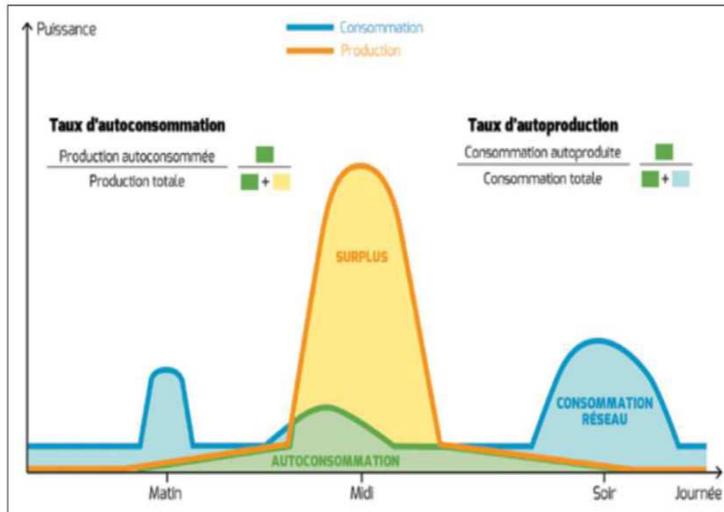
- Usage chaleur (280TWh/an) et couplage de vecteurs. Réseaux de chaleur ?
- Effacement : potentiel significatif (5GW selon RTE) mais à évaluer finement



<200°C

>550

Consommateurs-producteurs



- Déconnexion du réseau : ultra marginal.
- **Autoconsommation** : phénomène émergent (20 000 foyers en 2017, selon ENEDIS)
 - Selon RTE: 6-10GW en 2030 ? 3xPlus ??
 - Pour 17^e6 maisons individuelles PV+Batterie qq kWh => 25-50TWh annuel.
- Phénomène de « grande consommation »

Aucune vision système => Nécessité d'anticiper de manière centralisée



Approche Systémique et outils de modélisation

- **Multi-échelles spatiales et temporelles**, plusieurs outils nécessaires et Plateforme d'articulation
 - Outils **quasi-statiques** : de la minute à la décennie
 - Régime **dynamique** : inertie, fréquence, tension, synchronisme,
=> Nouveaux développements mathématiques ?
 - But : prédire complètement les trajectoires énergétiques et leurs **conséquences techniques**.
 - Métriques et Paramètres : choix à laisser libres
 - Intégrer fonctionnement d'ensemble du système
 - Trajectoires d'évolution
 - Consommations d'intrants, impacts, **eco-bilans, e ROI**, ...
=> Outils d'aide à la décision
 - Clé : **Accès aux données**
-



Conclusion générale

- Poser le plus clairement possible les termes de réflexion
 - Urgence à la prise de recul
 - Vérifier que les directions suggérées sont conformes aux objectifs

 - Manoeuvrabilité accrue du nucléaire ?
 - Changement des échelles d'équilibre ? (vers le local ?)

 - Besoins de back up ?
 - => **Role important de l'hydraulique**

 - Faisabilité du stockage ?
 - => **Role ESSENTIEL de l'hydraulique.**

 - => **Exigence d'analyse systémique** + Cycles de vie complets

 - Penser international et déclinaison industrielle
-



Annexes et compléments

Situation Énergétique Mondiale en 2015

La situation énergétique de la France est à comparer à la situation mondiale, dominée à plus de 80% par les énergies fossiles (voir **figure A-1**).

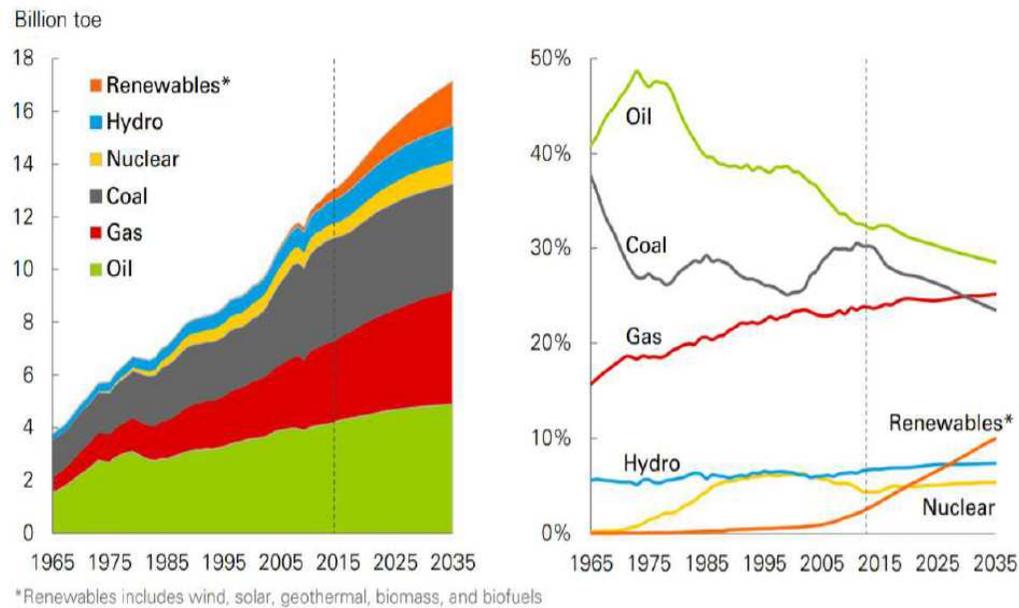
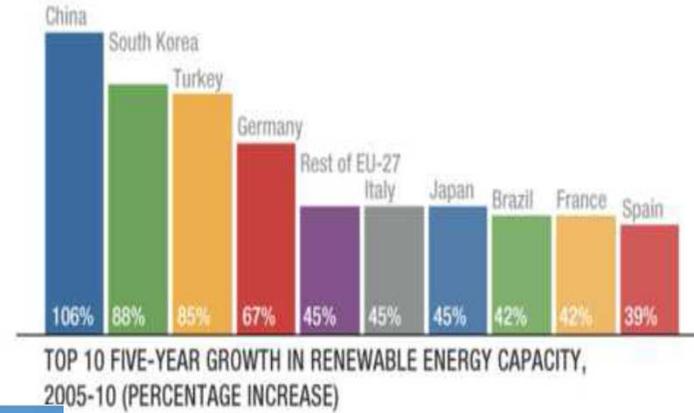
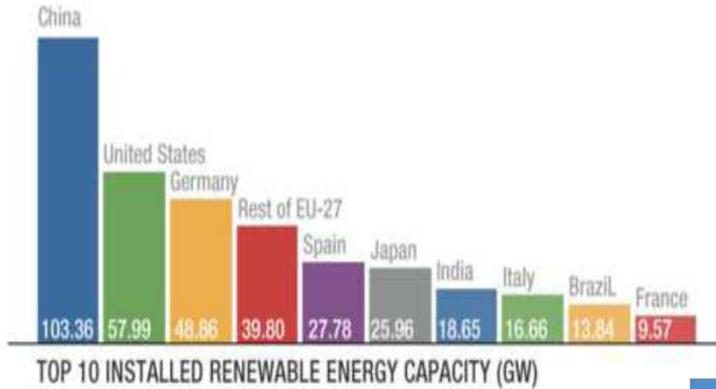


Figure A-1 : Trajectoire Énergétique Mondiale de 1965 à 2015 et extrapolation à 2035, d'après BP Energy Outlook 2017. A l'échelle mondiale les énergies fossiles représentent une large majorité de la ressource énergétique. L'ensemble des énergies décarbonées (Hydraulique, nucléaire et renouvelables) reste une part inférieure à 20% en 2015.

Energie dans le monde: une révolution ?

The Clean Energy Race?



Saint Herblain FR 7,2 MW 2018 ?



2016 France :
Typical : 3kWc
10-12k€
Energy return : 2,5y



Walney UK 367 => 660 MW 2018

Records de prix du PV : il se passe quelque chose ?

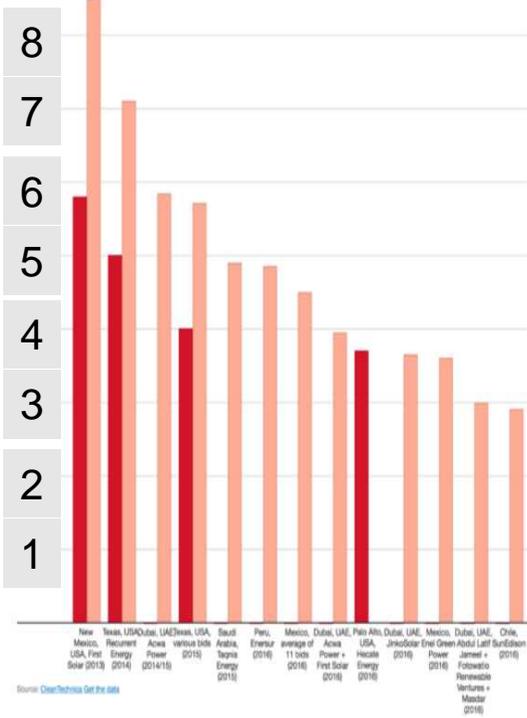
World's cheapest prices submitted for Saudi Arabia's first solar project
 Oct. 2017 : 1.79 cts/kWh

Aug. 2016 :
 New Low Solar Price Record
 Set In Chile — 2.91¢ Per kWh!

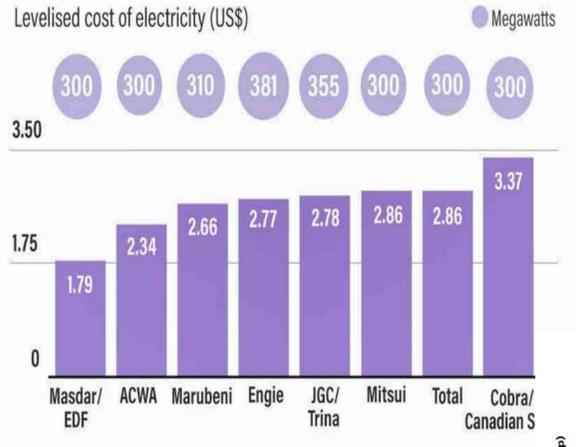
Low Solar Bids (2013-2016)

Prices agreed to under 20- and 25-year power purchase agreements. Note that the low bids in Texas are actually lower than the amounts represented in the chart... have not been revealed.

■ Subsidized Price (¢ per kWh) ■ Unsubsidized Price (¢ per kWh)



Bids for Saudi Arabia's Sakaka Solar Plant



France 2016 : 40-50€/MWh (1€/Wc)
 Cout de la production seulement...

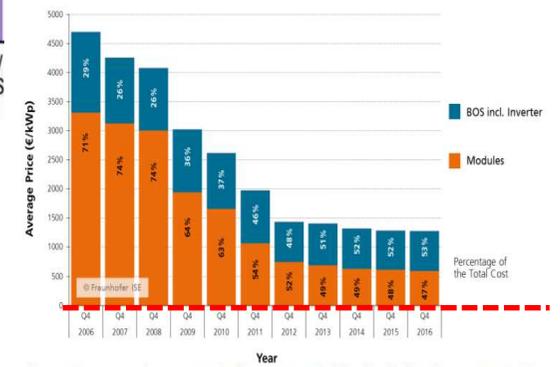
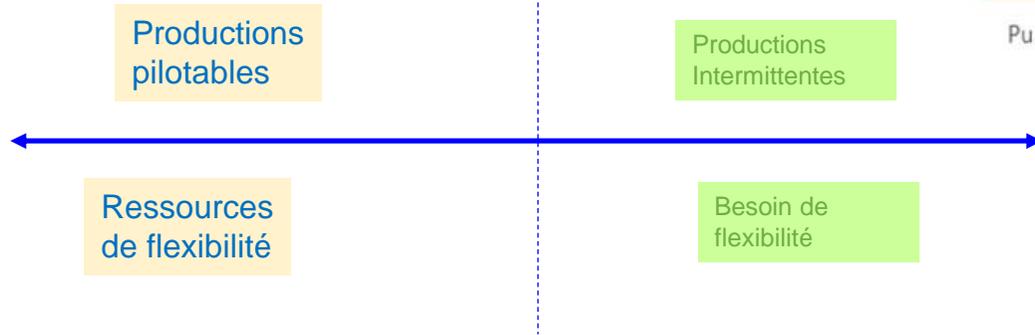
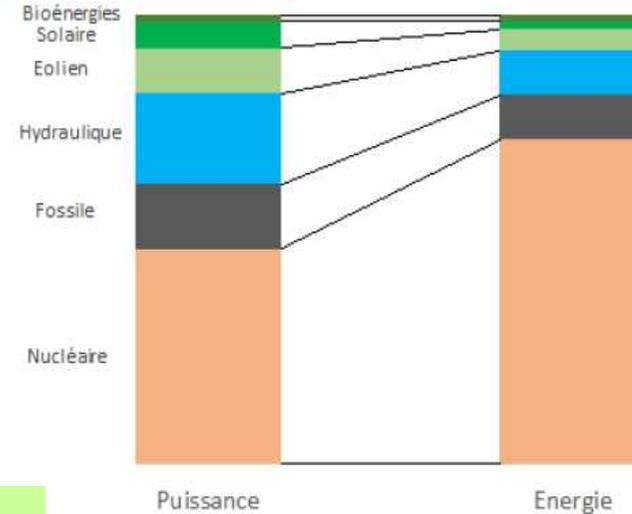


Figure 3: Average end customer price (net system price) for installed rooftop systems with rated nominal power from 10 - 100 kWp, data from BSW, plotted by PSE AG.

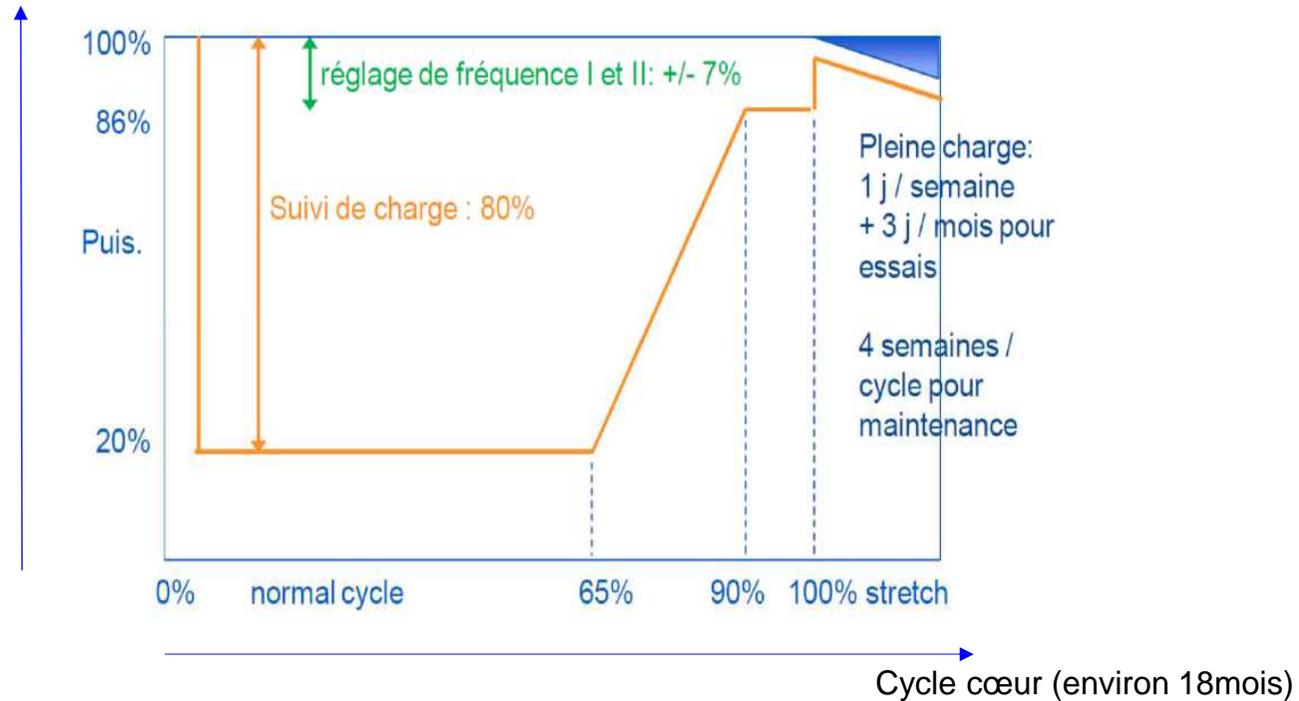
A- Production d'Énergie en France

	Fossile	Nucléaire	Hydra- ulique	EnR (Eolien, Solaire, Biomasse)
Puissance installée	14%	48%	20%	18% (10%, 6%, <2%)
Énergie produite/an	10%	72% (au plus bas depuis 1992)	10%	8% (4.5%, <2%, <2%)



B- Pilotabilité nucléaire et cycle combustible

Profondeur
réduction de
charge
Autorisée
(sans arrêt
cœur)

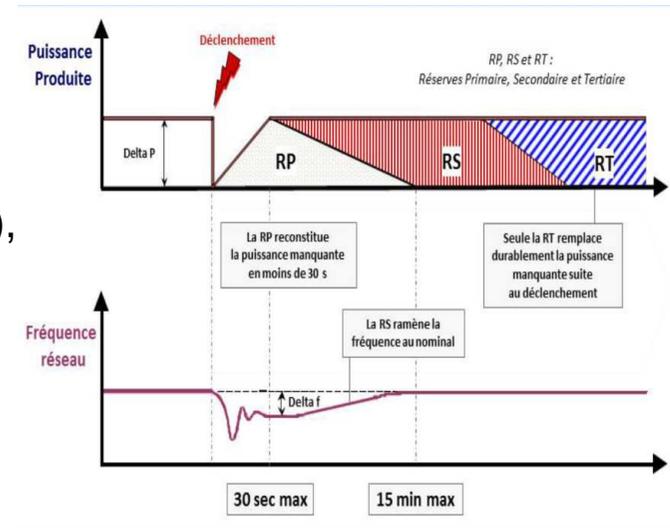


- Palier Prolongé à basse puissance + remontée rapide => risque de « déconditionnement » de la gaine (« crédits Interaction Pastille Gaine ou crédits K »)
- FPPI (>8h à <92%PMD) : plafond réglementaire 30 jours.

=> **Besoin de compréhension accrue des limites physiques, marges d'amélioration combustible.**

D- Challenges techniques actuels sur le réseau

- RTE : équilibre statique
 - Primaire +/-2.5% en 30s (>15 min),
 - Secondaire +/- 4.5% (5% /min variation),
 - Tertiaire ...
- Plan tension.
- Gestion des congestions en courant
- Maitrise des puissances réactives.



Stabilité Dynamique (< min), synchronisation de phase :

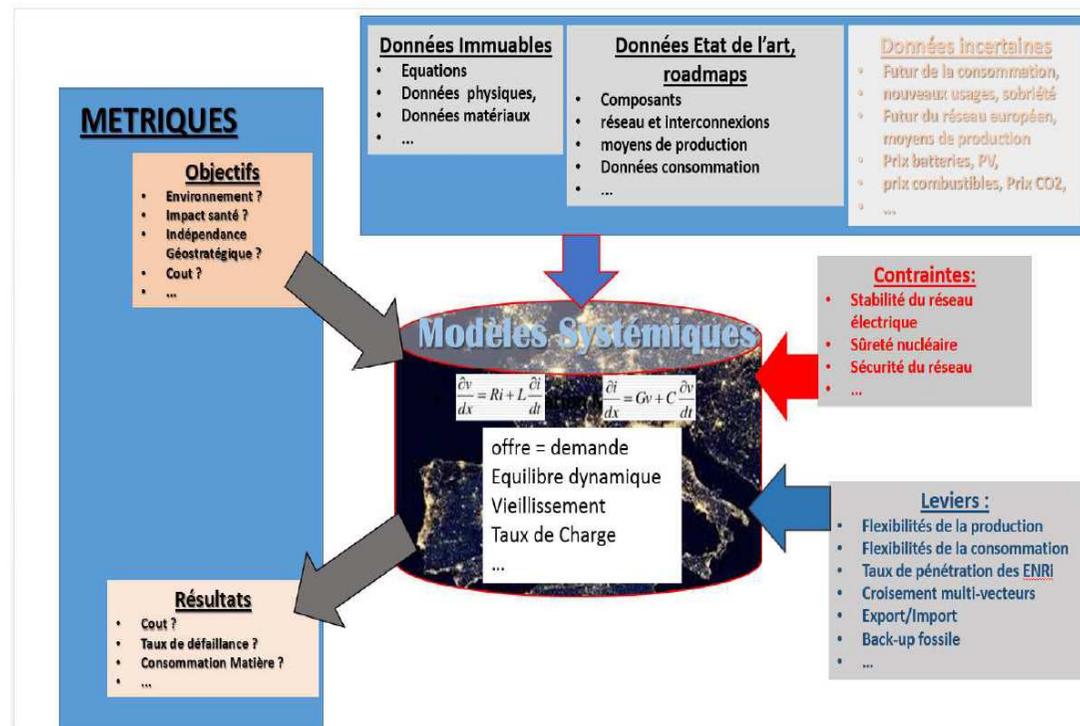
- Systemes Inductifs, machines tournantes => pilotage en EP, ...
- => inertie synthétique.
- Filtrage harmoniques



D- Challenges techniques futurs sur le réseau

- **Contrôle dynamique** des infrastructures
Exemple « dynamic line rating »
 - Structure du réseau : Réseaux reconfigurables, “auto-cicatrisants”, nouvelles architectures.
 - Ré-introduction de réseaux **continus** ?? (Tesla Versus Edison !!)
 - HVDC
 - Réseau local 100V DC ??
 - **Plans de protection**, gestion de défaillance
 - Black start, “grid forming”
 - Nouveaux canaux de contrôle (voie numérique ?)
 - Cyber-sécurité
-

G- Métriques et paramètres



- **Expliciter et ne pas figer les hypothèses d'entrée**
- **Travailler sur variables statistiques**



Exemples d'analyse système existantes

ANALYSE TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE EUROPÉEN AVEC 60% ENR

Alain Burtin
EDF R&D
Paris, 24 Novembre 2017

EDF

Bilan prévisionnel
de l'équilibre offre-demande d'électricité en France
ÉDITION 2017

DOCUMENT DE RÉFÉRENCE

RTE

Un mix électrique 100% renouvelable ?
Analyses et optimisations

24 Travail d'expansion des limites de développement des énergies renouvelables dans le mix électrique métropolitain à horizon 2035

Octobre 2015

et sap

Tools > Model Generators > TIMES

TIMES

The TIMES (The Integrated MARKt model generator for energy scenarios) methodology for energy scenarios 1 model generator combines two different approaches to modeling energy: a technical engineering approach and an economic approach, which uses linear programming to produce a least cost energy system to long-term time horizons. In a nutshell, TIMES is used for "the energy scenarios" (Loulou et al., 2005).

Overview of TIMES Modelling Tool

The TIMES (The Integrated MARKt model generator via Systems Analysis Program), an international community which uses long term environmental analysis (Loulou et al., 2004). The TIMES model generator combines two different approaches to modeling energy: a technical engineering approach and an economic approach, which uses linear programming to produce a least cost energy system to long-term time horizons. In a nutshell, TIMES is used for "the energy scenarios" (Loulou et al., 2005).

Model structure

TIMES models encompass all the steps from primary resources through

- Antares (RTE)
- Continental (EDF)
- Métys (ArtélyS)
- Times Markal (AIE)
- Kombikraftwerk (IWES)

Das regenerative Kombikraftwerk

START	KOMBIKRAFTWERK 1	KOMBIKRAFTWERK 2	ANSCHLUSSEPROJEKTE	FUNKTION
Projektkonzeption	Kombikraftwerk 2	Projektkonzeption	Partner	Kombikraftwerk 2, Der Netzbetreiber

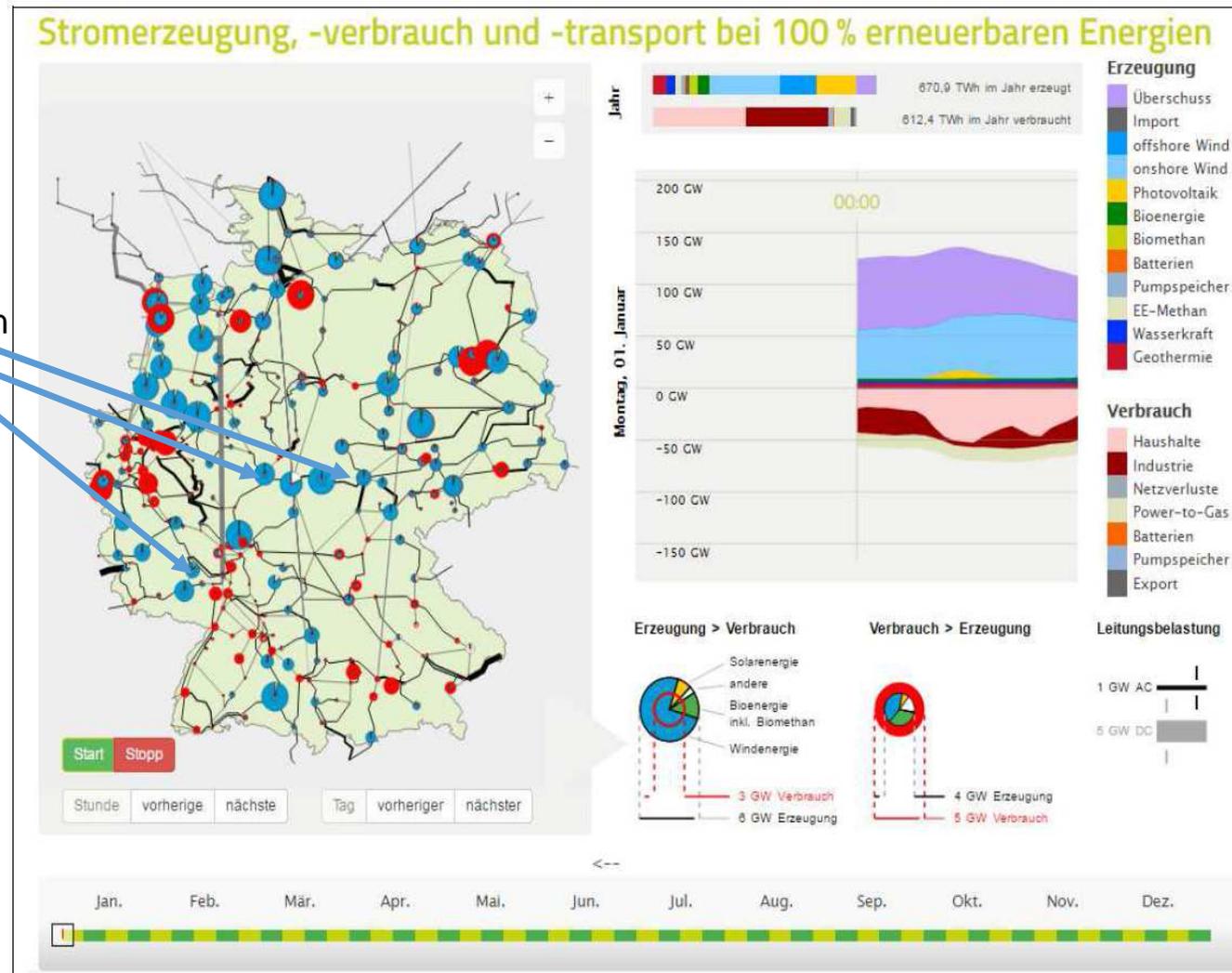
Projektinformationen Kombikraftwerk 2

Eine stabile Stromversorgung ist ein zentrales Anliegen der Projektbeteiligten. Die Übertragungsnetzkapazitäten werden durch die Projektbeteiligten, indem sie sogenannte **Systemdienstleistungen** beschreiben, um dadurch einen stabilen und netzbetrieblich zu gewährleisten.

Kombikraftwerk 2 Eine der Systemdienstleistungen ist die **Frequenzhaltung**. Die Frequenzhaltung ist die Balance zwischen Stromverbrauch zu jedem Zeitpunkt gehalten wird. Und das auch, wenn ein Kraftwerk plötzlich ausfällt. Ein Kraftwerk kann nicht zum Beispiel auch in Deutschland betrieben. Zur Frequenzhaltung schreiben die Übertragungsnetzbetreiber Regelungen aus. Regelmäßig wird von Kraftwerken oder Speichern

Exemple : EnergieWende/Kombikraftwerk (IWES)

Future Power Transmission Lines



Numérique et traitement de l'information

- Numérique au sens contrôle commande
Off line => Temps réel
- Pour mettre en oeuvre l'optimisation système
- **Software**
 - Apprentissage, construction de modèles
 - Détection d'anomalie
 - Outils de visualisation avancés
- **hardware**
 - Réseaux numériques (dédiés ?)
 - Capteurs
- Gestion de système complexe
- **Cybersécurité**

